УДК 53.08:519.6:550.3

МЕТОД ПОШАГОВОЙ АДАПТАЦИИ ШИРИНЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ИНТЕРВАЛА К ПАРАМЕТРАМ СИГНАЛА

Л. С. Терехов, А. А. Лаврухин

Омский государственный университет путей сообщения, 644046, г. Омск,
пр. Маркса, 35

E-mail: lev.terekhov@gmail.com, lavruhinaa@gmail.com

Указывается, что известные методы измерений исходного сигнала приводят к погрешностям, если ширина измерительных интервалов пошагово не адаптируется к меняющимся параметрам сигнала. Использован новый подход к измерению, раскрывающий единую физическую основу измерения и инструментального вычисления. Алгоритм, следствие указанного подхода, предназначен для получения дискретной последовательности отсчетов сигнала, соответствующих локально определяемым интервалам усреднения. Последовательность получаемых интервалов усреднения приближается к оптимальной и обеспечивает при измерении или решении вычислительной задачи уменьшение погрешности изменяющейся величины. Приведены результаты моделирования на трёх массивах отсчетов – с фиксированными и адаптируемыми интервалами усреднения.

Ключевые слова: интервал усреднения, неопределённость измерения, патент

© Терехов Л. С., Лаврухин А. А., 2019

Актуальность

Процесс измерения меняющейся во времени или пространстве величины с шумом, в частности – сигнала, вследствие несогласования методов измерения с измеряемыми меняющимися параметрами, нередко становится искусством. Известный тому пример – подбор вручную компромиссного значения ширины окна (иначе – интервала анализа или усреднения) при Фурье-анализе нестационарного процесса. Если анализ параметров сигнала проводится по массиву отсчетов, полученному на основе вручную установленного и обычно фиксированного измерительного интервала, то фиксированная ширина интервала измерения, не согласовываемая при каждом отсчёте с меняющимися параметрами сигнала ведёт к искажению первичной исходной информации. То есть, исходный сигнал может быть искажён ещё до его анализа.

Поводом к разработке нового подхода к измерению меняющейся в пространстве или времени величины послужил ранее необъяснимый эксперимент по радиозондированию максимума электронной концентрации ионосферного слоя F2 одновременно – сверху слоя (со спутника) и снизу слоя (с земной поверхности) [1]. Новизна измерения в соответствии с предложенным подходом состояла в адаптации полосы частот радиозондирования (параметр измерителя) к крутизне высоты слоя и отношению сигнал-шум (параметры измеряемого объекта) на каждом шагу, то есть – при каждом отсчёте [2]. Новизна подхода обусловлена выявленной возможностью минимизации неопределённости измерения высоты слоя при каждом отсчёте, что и позволило объяснить упомянутый качественно необъяснимый эксперимент [1, 3]. Однако алгоритм, реализующий указанный подход, был специализирован для решения конкретной задачи – для задачи при монотонной зависимости высоты слоя от частоты зондирования [2]. Указанный алгоритм составил основу способа радиозондирования параметров ионосферной плазмы, на который получен российский патент [4]. Ныне разработанный алгоритм усовершенствован для решения более общей задачи измерения – при произвольной зависимости измеряемой величины с шумом от времени.

К обоснованию постановки задачи

Однако усовершенствованный алгоритм измерения сейчас не может быть доложен, поскольку содержит предмет изобретения на способ амплитудно-цифрового преобразования.

Далее изложение ограничено существом и возможностями нового подхода к измерению меняющейся величины [3, 5]. В отличие от предложенного подхода общепринятая формула вычисления суммарной погрешности представляет сумму погрешностей разной природы как погрешностей независимых [6]. Это представлялось оправданным при сложении погрешностей столь разной природы как случайной и регулярной. Однако предложенное коренное преобразование радиолокационного соотношения неопределённостей, вопреки и фундаментальному соотношению неопределённостей классической физики, и упомянутой выше формуле суммирования независимых положительных слагаемых, представляет объединение случайного и регулярного компонентов неопределённости как величин взаимозависимых.

В переменных время t и частота f предложенное преобразование приведено в виде [3, 5]:

$$\Delta f \Delta t = \frac{1}{2\sqrt{\mu}} + \frac{(df/dt)(\Delta t)^2}{2}. \quad (1)$$

Здесь $\mu = (1 + P_s/P_n)$, где P_s и P_n – регулярная и случайная компоненты мощности импульса; $1 \leq \mu < \infty$.

Соотношение (1), названное динамическим соотношением неопределённости, не следует из известных соотношений физики и предложено в качестве постулата, составившего основу постановки задачи. Постулат включает также обобщение зависимости вещественных переменных f и t в форме дифференцируемой функции $f = f(t)$, интегрируемой в квадрате. В частности, широко используемые в радиофизике и радиотехнике переменные f и t могут представлять измеряемую частоту как функцию времени. Неопределённость определения величины f , вызываемая совместным действием приращения измеряемой величины и шума, представлена, исходя из постулата

(1), суммой случайного и динамического компонентов неопределённости [3, 5]:

$$\Delta f = \frac{1}{2\sqrt{\mu}\Delta t} + \frac{(df/dt)\Delta t}{2}. \quad (2)$$

Динамический компонент $(df/dt)\Delta t$ предложен как дифференциал функции $f = f(t)$, указывающий на существование регулярного физического процесса. Первый компонент в (2) отражает случайную часть всей погрешности, а второй – её регулярную динамическую часть. Видим, сумма обоих компонентов представляет непрямую взаимную зависимость, образуемую посредством общего интервала усреднения Δt . Зависимость (2) позволяет минимизировать сумму обеих неопределённостей, что приводит к неожиданному и практически важному результату – минимизированная сумма обеих неопределённостей может быть меньше каждой из неопределённостей в отдельности.

Результаты решения

Численные опыты и многочисленные апробации подтверждают, что если измерения и компьютерные вычисления проводятся по предложенной технологии, то результат компьютерного вычисления равнозначен натурному измерению, а не есть лишь модель натурного измерения. Поэтому испытания, равноценные натурным, проведены по предложенной технологии с применением инструмента вычислительного (компьютера). Наглядным испытательным сигналом в данном случае представляется сигнал с линейной частотной модуляцией и добавленным белым шумом, равным по мощности сигналу (0 дБ).

На рис. а и б показаны сигналы ЛЧМ с шумом, полученные на основе фиксированных отсчётов. На рис. а ширина фиксированного интервала близка периоду ЛЧМ-сигнала в его низкочастотной части. На рис.б ширина фиксированного интервала, напротив, близка периоду ЛЧМ-сигнала в его высокочастотной части.

На рис. в сигнал ЛЧМ с шумом, полученный при адаптации интервалов усреднения при каждом отсчёте, позволяет регистрировать колебания сигнала на всём пространстве изменяющихся периодов ЛЧМ-сигнала.

Обсуждение

Известны два уровня измерений – фундаментальный и прикладной [7]. Предложенный подход, представляя коренное преобразование фундаментального соотношения физики, приводит также и к реализуемому в натурных измерениях и компьютерных вычислениях алгоритму и поэтому подход можно считать удовлетворяющим одновременно обоим уровням.

Измерения и компьютерные (инструментальные) вычисления имеют различающиеся и методы, и инструментальные средства. Соответствующие погрешности по мере совершенствования методов и инструментов можно уменьшать, казалось бы, неограниченно. Однако объективно, как атрибуты физического явления, существуют ещё и неустранимые погрешности, называемые неопределённостями. Приборная и методическая база многих нынешних измерителей и компьютеров такова, что их остающиеся неустранимыми погрешности уже имеют природу неопределённостей.

Рисунок. Дискретизация ЛЧМ-сигнала с единичной амплитудой и белым шумом: ширина интервала усреднения остаётся постоянной и равна 0.05 относительной единицы времени (а) и 0.001 относительной единицы времени (б); ширина интервала вычисляется в соответствии с параметрами сигнала при каждом отсчёте (в)

Неустраняемая неопределённость и интервал усреднения, согласно разработке, определяются лишь параметрами измеряемого сигнала при условии, что различающимися устранимыми погрешностями измерительных и вычислительных устройств можно пренебречь. То есть, при исследуемом сигнале его обработка по предложенному алгоритму приводит к результатам, равносильно натурным и от измерительного прибора, и от вычислительного.

Ранее было показано [2, 3], что минимуму суммы неопределённостей случайного и регулярного компонентов соответствует минимум энергии соответствующего физического процесса. Измерение и вычисление, при условии их проведения согласно указанной новой технологии, соответствуют ходу естественного физического процесса, идущему в соответствии с принципом наименьшего действия.

Условие интегрируемости в квадрате функции $f = f(t)$ означает для измеряемых и инструментально вычисляемых величин конечность энергии соответствующих про-

цессов, что ограничением для использования разработанного алгоритма практически не является.

Алгоритм привёл к большей точности и меньшему количеству отсчётов (или, при вычислении – узлов), что необходимо при измерении и управлении быстрыми процессами в реальном времени.

Выводы

Предложенный алгоритм можно видеть полезным звеном в составе измерительно-информационной и управляющей систем.

Финансовая поддержка изобретений со стороны СО РАН и региональных вузов в настоящее время «не предусмотрена». Поэтому подача Заявки на изобретение с оплатой пошлины возможна лишь при финансовой поддержке компании, имеющей финансовый и/или научный интерес к предлагаемому изобретению.

Список литературы/References

- [1] Piggott W. R., Rawer K., *URSI Handbook of Ionogram Interpretation and Reduction*, U. S. Department of Commerce, 1972, 192 с.
- [2] Терехов Л. С., “О полной погрешности радиоволновых измерений параметров неоднородного слоя плазмы”, *Геомагнетизм и аэронавигация*, **38**:6 (1998), 142–148. [Terekhov L. S., “O polnoy pogreshnosti radiovolnovykh izmereniy parametrov neodnorodnogo sloya plazmy”, *Geomagnetizm i aeronomiya*, **38**:6 (1998), 142–148, (in Russian)].
- [3] Terekhov L. S., Lavrukhin A. A., “On affinity of physical processes of computing and measurements”, International Symposium on Scientific Computing, Computer Arithmetics and Verified Numerics SCAN’2012 (Novosibirsk), 2012 <http://conf.nsc.ru/files/conferences/scan2012/139644/TerekhovLavrukhin-scan2012.pdf>.
- [4] Терехов Л. С., Зеленков В. Е., Шапцев В. А., *Способ определения профиля электронной концентрации слоя плазмы*, Пат. 2066051 РФ, МПК G01N22/00. Бюллетень изобретений № 14 от 1996 г. Заявитель ИИТПМ СО РАН; заявл. 05.11.1992; опубл. 26.01.1995..
- [5] Terekhov L. S., Lavrukhin A. A., *The measuring-computing algorithm, based on the dynamic uncertainty relation*, Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). Proceedings of conference. (Omsk), 2017 <http://ieeexplore.ieee.org/document/8239518/>.
- [6] *Применение «Руководства по выражению неопределённости измерений» МИ 2552-99.*, Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений, ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, Санкт-Петербург, 1999.
- [7] Стахов А. П., *Введение в алгоритмическую теорию измерения*, Советское радио, М., 1997, 288 с. [Stakhov A. P., *Vvedeniye v algoritmicheskuyu teoriyu izmereniya*, Sovetskoye radio, M., 1997, 288 pp., (in Russian)].

Список литературы (ГОСТ)

- [1] Piggott W. R., Rawer K. *URSI Handbook of Ionogram Interpretation and Reduction*. U. S. Department of Commerce, 1972. 192 с.
- [2] Терехов Л. С. О полной погрешности радиоволновых измерений параметров неоднородного слоя плазмы // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 1998. Т. 38. №6. С. 142–148.

- [3] Terekhov L. S., Lavrukhin A. A. On affinity of physical processes of computing and measurements // International Symposium on Scientific Computing, Computer Arithmetics and Verified Numerics SCAN'2012. Novosibirsk. 2012. <http://conf.nsc.ru/files/conferences/scan2012/139644/TerekhovLavrukhin-scan2012.pdf>
- [4] Терехов Л. С., Зеленков В. Е., Шапцев В. А. Способ определения профиля электронной концентрации слоя плазмы. Пат. 2066051 РФ, МПК G01N22/00. Бюллетень изобретений № 14 от 1996 г. Заявитель ИИТПМ СО РАН; заявл. 05.11.1992; опубл. 26.01.1995.
- [5] Terekhov L. S., Lavrukhin A. A. The measuring-computing algorithm, based on the dynamic uncertainty relation. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). Proceedings of conference. Omsk. 2017. <http://ieeexplore.ieee.org/document/8239518/>
- [6] Применение «Руководства по выражению неопределённости измерений» МИ 2552-99. Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений. Санкт-Петербург:ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 1999.
- [7] Стахов А. П. Введение в алгоритмическую теорию измерения. М.: Советское радио, 1997. 288 с.

Для цитирования: Терехов Л. С., Лаврухин А. А. Метод пошаговой адаптации ширины измерительного интервала к параметрам сигнала // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. 2019. Т. 29. № 4. С. 201-207. DOI: 10.26117/2079-6641-2019-29-4-201-207

For citation: Terekhov L. S., Lavrukhin A. A. Method for step-by-step adaptation of the width of measurement interval to signal parameters, *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*. 2019, **29**: 4, 201-207. DOI: 10.26117/2079-6641-2019-29-4-201-207

Поступила в редакцию / Original article submitted: 21.10.2019

DOI: 10.26117/2079-6641-2019-29-4-201-207

PACS 06.20Dk

METHOD FOR STEP-BY-STEP ADAPTATION OF THE WIDTH OF MEASUREMENT INTERVAL TO SIGNAL PARAMETERS

L. S. Terekhov, A. A. Lavrukhin

Omsk State Transport University, 644046, Marx ave., 35, Omsk, Russia

E-mail: lev.terekhov@gmail.com, lavruhinaa@gmail.com

It is indicated that the known methods for measuring some initial signal lead to errors if the width of the measuring intervals does not step by step adapt to changing signal parameters. A new approach to measurement is used, revealing a unified physical basis for measurement and instrumental computation. A new algorithm as a consequence of this approach is designed to obtain a sequence of discrete samples that matched to locally determined averaging intervals. Resulting sequence of averaging intervals ensures a decrease in the measurement or computing error. The results of calculations on three arrays of samples are presented – with fixed and adaptable averaging intervals.

Key words: averaging interval, measurement uncertainty, patent.

© Terekhov L. S., Lavrukhin A. A., 2019